

USO DE ANALÍTICA VISUAL PARA CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN DE PUNZADOS Y DIAGNÓSTICO DE EFECTIVIDAD EN LOS DISEÑOS DE COMPLETACIÓN Y ESTIMULACIÓN EN POZOS NO CONVENCIONALES – EXPERIENCIA OPERATIVA EN LA FM. VACA MUERTA

Franco Simone¹, Mariano Puigdégolas¹, M. Santiago Pucho¹, Matías Acosta¹, Ivo Foianini²,
Diego Arcanjo², Emiliano López³, José Ángel López³

1: Total YPF S.A. franco.simone@ypf.com, mariano.puigdengolas@ypf.com,
miguel.s.pucho@ypf.com, matias.acosta@ypf.com

2: EV The Downhole Visual Analytics Company. ivo.foianini@evcam.com, diego.arcanjo@evcam.com

3: Welltec Argentina. elopez@welltec.com, jlopez@welltec.com

Palabras clave: Entrada Limitada, Eficiencia de *Clusters*, Cámara de Fondo, Imagen de Punzados, Erosión de Punzados

ABSTRACT

In recent years, unconventional hydrocarbon reserves have been successfully developed worldwide as a result of the implementation of the “factory model”, which is driven by the repeated use of key operational technologies, primarily horizontal drilling and hydraulic fracturing.

Operating companies continuously pursue ways to optimize their completion and stimulation designs to increase well productivity and recovery rates, striving to minimize operational impact. A key aspect necessary to maximize production in wells designed with multiple fracturing stages is to fine-tune perforation configuration and efficiency.

Perforation Analysis, a diagnostics service performed by running downhole video cameras, provides post stimulation in-situ images and dimensions of each perforation. With this information, operators can quantify how much erosion each perforation suffered throughout hydraulic fracturing process of each stage, which directly relates to the efficiency of both the completion and stimulation designs in each well.

The data obtained can be statistically analyzed to identify trends, biases, and variances at the stage, *cluster*, and perforation level. These results can also be used to update the number of perforations (NP) and perforation diameter (DP) variables in the Limited Entry equation, optimizing pressure differentials during stimulation and thus improving on their design.

This service was recently implemented successfully in a shale oil well targeting the Vaca Muerta formation. The results helped to establish a comparison of different completion designs used in the well, identifying key variables providing the best fracture development metrics. These results now act as reference for implementation in upcoming development wells.

INTRODUCCIÓN

La manera de establecer comunicación entre un pozo y el reservorio no convencional, a través de los punzados, tiene una influencia directa en la geometría de fractura que se busca generar para maximizar el volumen de roca contactada. Una forma de conseguirlo es reduciendo la distancia entre *clusters* (grupos de punzados). Esto puede lograrse de dos maneras: disminuyendo la longitud de etapa y manteniendo constante la cantidad de *clusters* o bien manteniendo constante la longitud de etapa e incrementando la cantidad de *clusters* en ella.

Al aplicar la opción de longitud de etapa constante, se debe tener en cuenta que, a mayor número de puntos de iniciación, se incrementa el riesgo de una divergencia en punzados ineficientes. Este escenario puede resultar en una distribución inadecuada del tratamiento de estimulación (Fig. 1). Por otro lado, reducir la longitud de etapas aumenta la cantidad de las mismas dentro del pozo, lo cual podría incrementar los tiempos, la cantidad de insumos y finalmente el costo de la terminación.

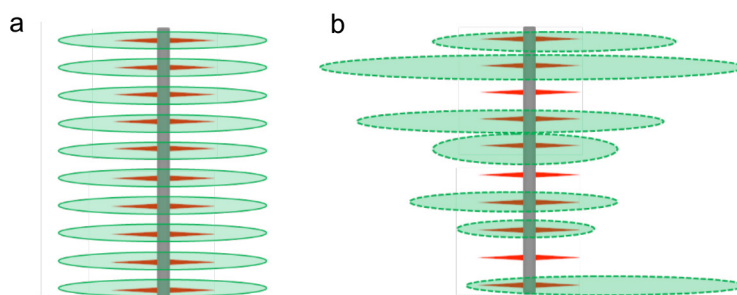


Figura 1. Representación ilustrativa de distribución homogénea (a) y falta de uniformidad e ineficiencia en la divergencia del tratamiento (b).

HISTORIA

En el inicio de la fase de desarrollo de Vaca Muerta a través de pozos horizontales se comenzó replicando los diseños de pozos verticales, en los cuales existía un riesgo de superposición de fracturas y *clusters* ubicados en zonas con distintas litologías. Estas asunciones no son extrapolables a pozos horizontales por lo tanto se procedió a desafiar técnicamente los criterios de diseño a través de las observaciones en campo y ejecución de pozos pilotos. Esto llevó a definir e implementar el actual diseño de punzados para los bloques que actualmente se operan. El principal criterio técnico que evolucionó en este proceso fue el cambio de número de *clusters*.

Debido a la incertidumbre que genera un cambio en los diseños de completación por la falta de datos concluyentes durante su implementación y evaluación, los cambios en la cantidad de *clusters* por etapas fueron realizados de manera paulatina buscando generar geometrías de fractura relativamente homogéneas (Fig. 2).

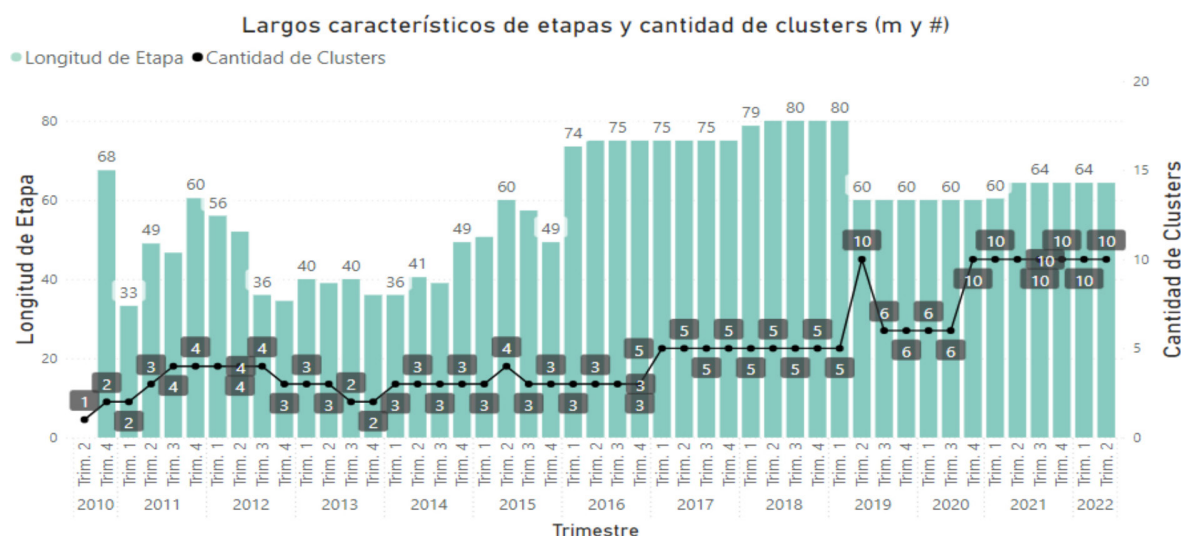


Figura 2. Se muestran más de diez años de historia donde se puede observar un cambio en las variables de diseño (longitud de etapa y cantidad clusters) tendiendo a la estandarización a partir de 2016.

ENTRADA LIMITADA

La técnica de completación comúnmente conocida como Entrada Limitada consiste en generar puntos de iniciación de fracturas donde el área total de comunicación pozo-reservorio se minimiza con la intención de producir un diferencial de presión que favorezca una distribución homogénea del tratamiento a través de los clusters (Cramer 1987). A lo largo de este trabajo se describirán las experiencias y casos de estudio alcanzados para entender qué efecto se obtuvo al restringir la cantidad de orificios por cluster y en consecuencia por etapa en pozo horizontales, mejorando así el diseño de Entrada Limitada.

Esta técnica, la cual restringe el paso del fluido a través de los punzados, tiene sus ventajas y limitaciones. Por un lado, los pozos horizontales presentan la ventaja de navegar la zona de interés, reduciendo de esta forma los contrastes litológicos. Por otro lado, debido a los regímenes de esfuerzos predominantes en la formación Vaca Muerta y la dirección en que deben ser navegados los pozos para garantizar una adecuada geometría de fractura, es posible encontrar presiones de iniciación de fractura elevados (Khan *et al.* 2016). Esto representa un desafío para la divergencia del fluido entre los distintos punzados realizados.

Regímenes de Estrés	Presión de Ruptura	$\Delta\sigma$
Régimen Normal ($\sigma_v > \sigma_{Hmáx} > \sigma_{Hmín}$)	$2\sigma_{Hmáx} - \Delta\sigma - \alpha P_p + T_0$	$\sigma_v - \sigma_{Hmáx}$
Regimen Strike-slip ($\sigma_{Hmáx} > \sigma_v > \sigma_{Hmín}$)	$2\sigma_{Hmáx} - \Delta\sigma - \alpha P_p + T_0$	$\sigma_{Hmáx} - \sigma_v$
Régimen Inverso ($\sigma_{Hmáx} > \sigma_{Hmín} > \sigma_v$)	$2\sigma_{Hmáx} - \Delta\sigma - \alpha P_p + T_0$	$\sigma_{Hmáx} - \sigma_v$

Tabla 1. Presiones de ruptura en pozos horizontales para diferentes regímenes de estrés (Khan *et al.* 2016)

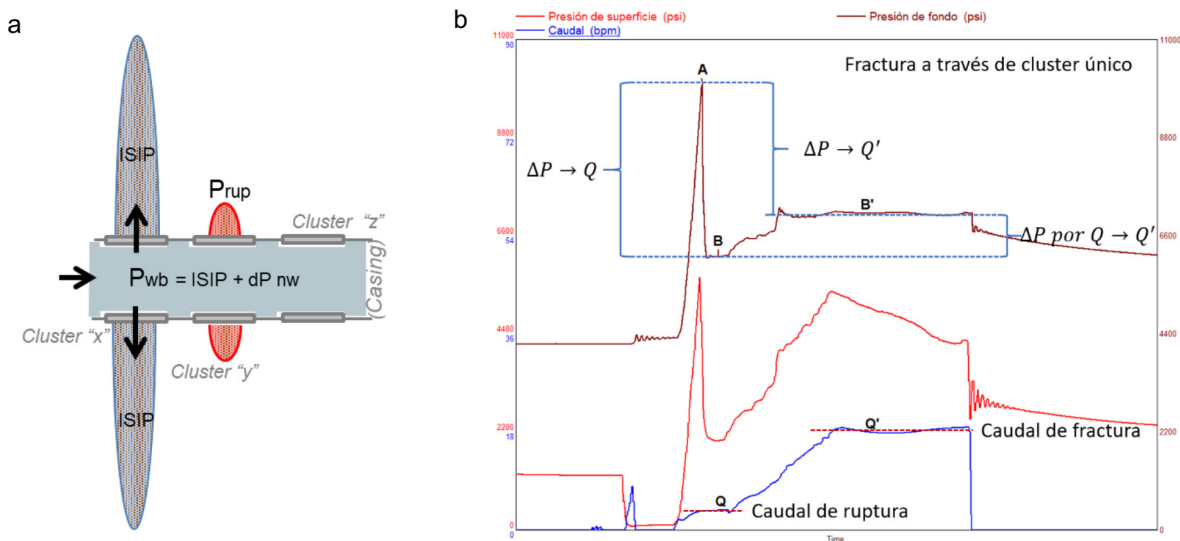


Figura 3. Ilustración de efecto de entrada limitada a) y carta de fractura representativa b).

El fenómeno anterior, entre otros, explica por qué una carta de fractura suele tener una forma característica que es fácilmente identificable: una presión mayor al inicio de la fractura (punto A, Fig. 3) conocida como presión de ruptura, correspondiente a una fractura desarrollándose en las cercanías del pozo y luego ocurre una transición hacia una estabilización de presión menor (punto B, Fig. 3) debido al crecimiento de la fractura en la roca sin alteraciones.

Este fenómeno supone un problema cuando se fractura a través de varios *clusters*, ya que es necesario volver a superar la presión de ruptura en cada uno de los *clusters* (punto A, Fig. 3) para seguir iniciando fracturas en cada uno de ellos.

La técnica de entrada limitada busca resolver el problema generando una restricción al paso del fluido a través de los punzados, generándose así un diferencial de presión que mantenga en el interior del *casing* una presión mayor a la existente, “aguas abajo”, dentro de la o las fracturas ya iniciadas. El diferencial de presión mencionado puede observarse en la Figura 3, sobre los puntos Q' y B' donde se estabiliza el caudal a un mayor valor con su correspondiente presión de fondo.

Para el diseño de una caída de presión, se asume que cada punzado se comporta como una placa orificio (Norma ISO 5167-2) y ese extra de presión va a ser función del diámetro del punzado, de la cantidad de punzados y del caudal de bombeo. (Fig. 4)

$$\Delta P_{perf} = \frac{0.237 \rho (Q)^2}{Cd^2 D^4 (N)}$$

ΔP_{perf} = Diferencial de presión (psi)
 ρ = Densidad del fluido (lb/gal)
 Q = Caudal (bpm)
 Cd = Coeficiente de descarga
 D = Diámetro (in)
 N = N° de orificios

Figura 4. Ecuación para estimar la caída de presión en los punzados.

Al supuesto mencionado se le adiciona la incertidumbre en el diámetro de los punzados en condiciones de fondo y la forma de estos (coeficiente de descarga). Esto complejiza aún más la medición de eficiencia de *clusters* a partir de datos de superficie, entendiéndose por eficiencia de *clusters*, a cuántos de los punzados que se realizan se convierten verdaderamente en fracturas.

Dentro de las incertidumbres que pueden surgir, se destacan: alteraciones generadas en la roca a causa de los punzados, variación en la orientación de los punzados entre los distintos *clusters* y fenómenos de dispersión como el conocido *heel bias*, tendencia natural de favorecer a los punzados que se encuentran aguas arriba al momento de tomar fluido, quedando de esta forma menor caudal disponible para los *clusters* aguas abajo (Fig. 5).

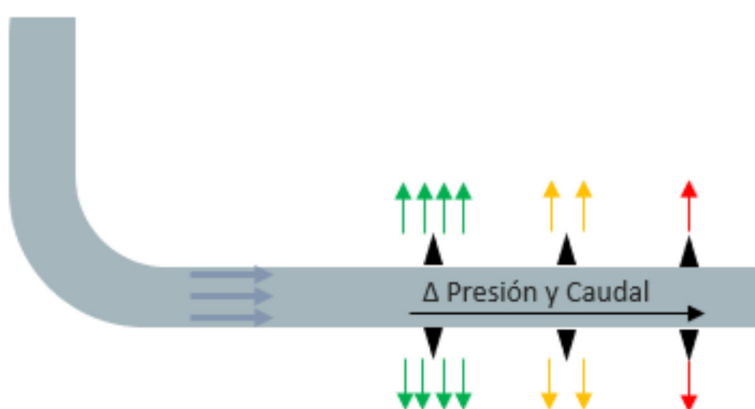


Figura 5. Ilustración esquemática del efecto *heel bias*

Por todo lo mencionado se vuelve indispensable contar con mediciones que permitan entender qué ocurre en el subsuelo. Entre algunas de las técnicas que permiten lograr mayor grado de entendimiento y reducir estas incertidumbres encontramos: trazadores, arenas trazadas, registros de producción (PLTs), etc. Estas técnicas tienen costos relativamente bajos, pero el entendimiento acerca de cuántos punzados toman fluido durante la fractura es pobre. Por otro lado, existen tecnologías específicas para este tipo de análisis como fibra óptica permanente y cámaras de fondo. La primera aporta información de alta fiabilidad a un costo elevado y con alta complejidad operativa, dejando a la medición con cámaras como una opción óptima desde el punto de vista técnico económico.

CÁMARA DE FONDO

Descripción de la tecnología

Dado el reciente avance tecnológico en cámaras de video, estas herramientas ofrecen la posibilidad de identificar situaciones dentro de pozo con alta definición. Este beneficio ya no es

exclusivo del ámbito operativo, sino que incluye también el área de estudios subsuperficiales con la entrega de valores cuantificables a través del dimensionamiento *in-situ*.

El Análisis de Punzados es un ejemplo particular, ya que está enfocado en el diagnóstico de la eficiencia de la terminación en pozos no convencionales. Este servicio consiste en adquirir imágenes de los punzados presentes en la cañería de producción dentro del tramo lateral una vez realizada la estimulación del pozo. Al dimensionar los punzados, podemos determinar cuánta erosión sufrieron por el paso del fluido de estimulación (agente sostén, agua, etc.) para iniciar la propagación de las fracturas en la formación productora.

El servicio se lleva a cabo usando una cámara de video diseñada con cuatro cámaras laterales que cubren toda la circunferencia de la pared interna de la cañería. Las imágenes a color y en alta definición que provee esta herramienta pueden ser adquiridas en tiempo real o en memoria, ofreciendo flexibilidad operativa según las condiciones de los equipos disponibles en el *pad*.

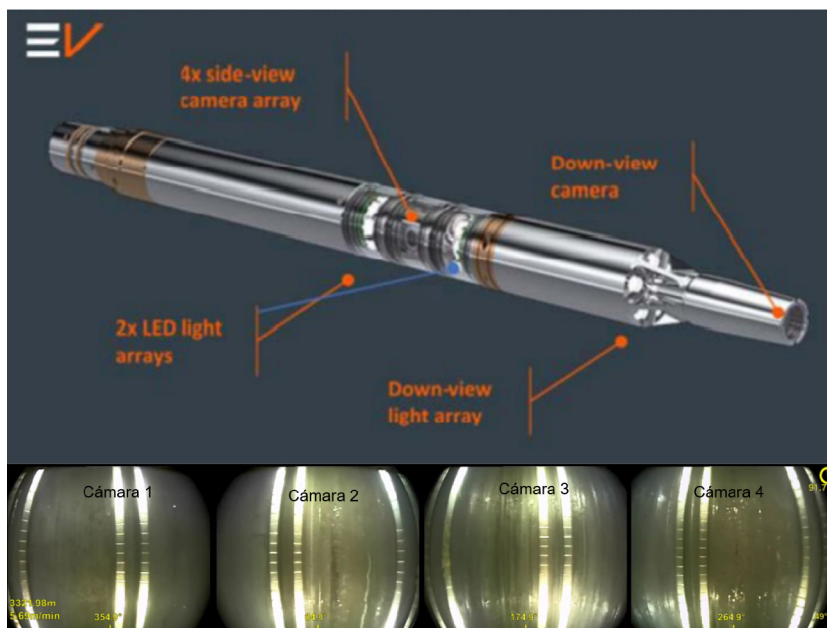


Figura 6. Cámara de fondo usada como parte del servicio de Análisis de Punzados, consistente de cuatro lentes laterales posicionados ortogonalmente para cobertura circunferencial completa de la pared interna de la cañería.

El principio teórico del Análisis de Punzados se basa en la relación directa que existe entre el aumento en las dimensiones de los punzados y la cantidad de agente sostén que atraviesa por estos durante la estimulación del pozo. Los punzados con mayor erosión fueron expuestos a un mayor volumen de agente sostén, resultando en una mayor propagación de facturas en ese sector del tramo lateral del pozo.

Los flejes referenciales (bandas color plateado posicionadas verticalmente en la imagen) forman parte de la sarta bajada en el pozo. Estos elementos se moldean a las dimensiones de la



Figura 7. Imagen representativa *in situ* de punzado erosionado.

caería para estar ubicados siempre en el mismo plano en el que se encuentran los punzados. Esto es clave, ya que permite hacer una referencia directa de una medición física (grosor de los flejes, en pulgadas) con una medición digital (dimensiones dentro de la imagen, en píxeles), permitiendo así el dimensionamiento de elementos dentro de pozo (Roberts *et al.* 2018).

Cada punzado dimensionado, como parte de múltiples *clusters* y etapas diagnosticadas por el servicio, provee una gran cantidad de datos que pueden ser presentados estadísticamente, facilitando la identificación de tendencias y sesgos en la efectividad de los diseños de completación y estimulación usados en el pozo. Este servicio es de particular interés, ya que permite actualizar la variable diámetro promedio de punzado en la ecuación de estimulación por Entrada Limitada (Fig. 4), para así corregir los valores de caída de presión obtenidos durante la estimulación.

Es también posible identificar limitaciones asociadas con completación geométricas, como ser sesgos talón/punta (*toe/heel bias*) o por posición azimutal, lo cual permite al Análisis de Punzados servir como punto de partida para implementar mejoras personalizadas a la completación de cada pozo, pad, o área de un campo (Roberts *et al.* 2022).

El uso particular de la cámara multi-lente también ayuda a realizar evaluaciones visuales del área de asentamiento de tapones de fractura en cada etapa como parte de la operación del Análisis de Punzados. Este resultado es de suma importancia, ya que ayuda a determinar si los tapones funcionaron correctamente en su operación de asentamiento y aislamiento, logrando la hermeticidad requerida para obtener el sistema cerrado necesario durante la estimulación de cada etapa. De igual manera, la identificación de un posible mal funcionamiento de un tapón provee valiosa información sobre las repercusiones identificadas en la operación de estimulación de su correspondiente etapa (Strubberg *et al.* 2020).

Si bien la tecnología de cámaras ha sido usada en operaciones de pozo desde hace décadas, recién hace algunos años que los avances en electrónica han permitido aplicar esta tecnología a la medición de elementos *in situ* por los requerimientos en calidad y resolución de las imágenes obtenidas. Esto es fundamental para el Análisis de Punzados, dado que estos orificios son muy pequeños y se encuentran distribuidos en extensiones muy largas de pozo, por lo cual es indispensable contar con una tecnología con varias cámaras, iluminación artificial y que pueda obtener imágenes de alta resolución a una velocidad de avance razonable.

Experiencias con cámara de fondo

Para el trabajo presentado se cuenta con datos obtenidos a partir de tres operaciones en las que se aplicó esta tecnología para el entendimiento del diseño de estimulación.

En todas las experiencias se realizó una serie de punzados extra, denominado “punzados base” o “punzados vírgenes” (sin estimular), con la finalidad de ser medidos en su estado previo a la erosión por el paso de arena. Estos sirven como base de comparación para determinar cuántos punzados fueron erosionados y en qué medida cambian sus dimensiones durante las operaciones de fractura.

Dos de las operaciones realizadas formaron parte de un plan de adquisición de datos donde se diseñaron pruebas específicas buscando entender cuál es la mejor configuración de punzados. Se utilizaron diseños estándar para la empresa, diseños de entrada limitada extrema y una serie de diseños con distinta configuración de orificios por *cluster*: distribución simétrica y distribución variable “*taper perf*”. Esta última consiste en incrementar progresivamente área de flujo hacia la base de los punzados y así buscar mitigar el mencionado efecto de *heel bias* (Fig. 8). En todos los casos se bombeó el mismo volumen de fluido y agente sostén. También se mantuvo constante la variable “largo de etapa” con una distribución simétrica de los punzados dentro de esta longitud.

Durante la primera prueba piloto hubo contingencias operativas que sólo permitieron obtener información parcial sobre las dimensiones de los punzados bases. Estas dificultades operativas motivaron la implementación de mejoras tecnológicas en la cámara de fondo y también en las maniobras operativa necesarias para su carrera a lo largo del pozo.

En la segunda experiencia, el objetivo principal de la medición fue obtener la eficiencia de *clusters* en diseños con divergencia mecánica, de la cual también se pudieron obtener medición de erosión y experiencia operativa con unidad de *coiled tubing*, información útil para complementar y soportar las conclusiones de este trabajo.

De esta manera en la tercera prueba pudieron realizarse todas las mediciones planificadas, se corrió la cámara por medio de *coiled tubing*, remplazando el *wireline* y tractor utilizados en la primera experiencia. Además, se eliminó la medición de los orificios en tiempo real y sólo se tomaron las imágenes que fueron analizadas posteriormente, permitiendo reducir los tiempos de operación.

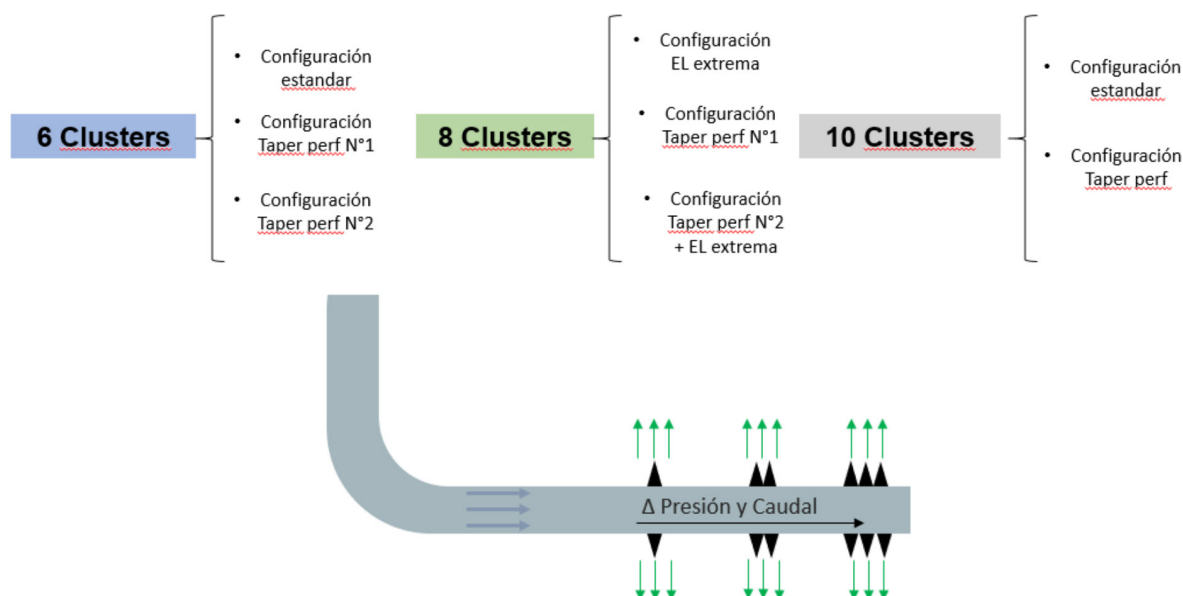


Figura 8. Diseño de experimento de punzados.

Resultado de las mediciones

Como en todo análisis, es buena práctica conocer el grado de precisión de la técnica o tecnología con la que estamos analizando. Uno de los motivos que dan confianza a los resultados observados en este trabajo es el grado de precisión confirmado que presenta la cámara de fondo. Se ha demostrado que la interpretación de las imágenes tiene un grado de precisión de 0,008", es decir, alrededor de un 2% del tamaño de un orificio de 0.35" (Roberts *et al.* 2018).

Diámetro de orificios

El primer dato obtenido se trata del diámetro de los punzados bases (Fig. 9), esto permite eliminar una de las incertidumbres de la mencionada ecuación para el cálculo de caída de presión en punzados (Fig. 4). En el gráfico que se muestra a continuación se observan las 3 experiencias mencionadas anteriormente:

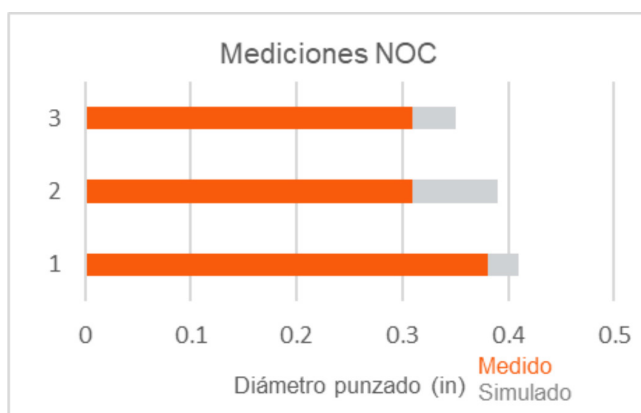


Figura 9. Comparación estadística punzado base medido por cámara versus simulados

Otra de las mediciones que se realizó sin ser planificada fue la comparación entre los punzados vírgenes realizados adrede con el fin de sentar una línea base y la posterior comparación con los punzados erosionados, versus punzados vírgenes de las etapas que no mostraron signos de erosión. Se observó que los diámetros de los orificios en ambos casos eran los mismos.

Esta misma comparación también permitió evidenciar que tampoco hay impacto del tamaño del cañón, sino que el tamaño del orificio depende sólo de la carga. Esta última comparación pudo realizarse dado que la compañía de servicio de los punzados base y punzados de las etapas, no fue la misma. En un caso se utilizaron cañones de 3 3/8" y en el otro caso de 3 1/8", y en ambos casos la carga fue la misma (Fig. 10).

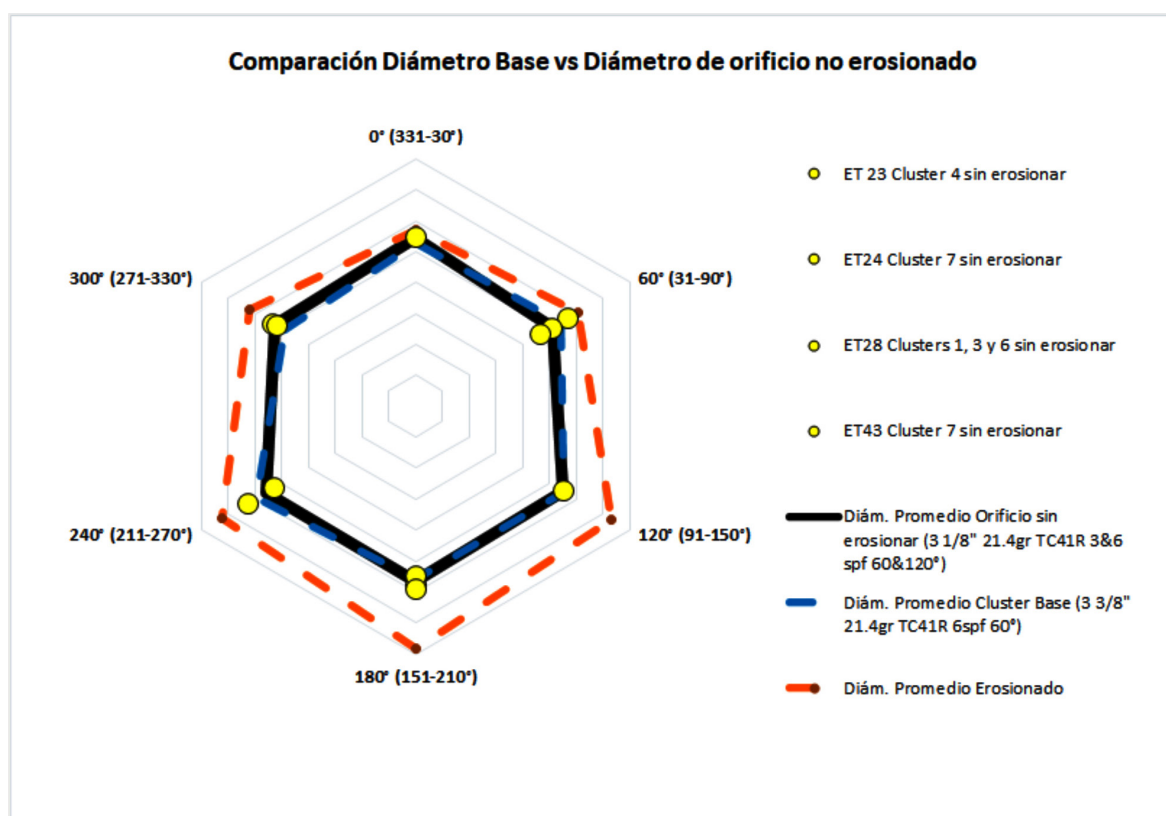


Figura 10. Comparación de diámetro de punzado base versus diámetro de punzado sin signos de erosión

También se observó que el diámetro medido en profundidad es alrededor de un 10% menor que el simulado a partir de ensayos de superficie. Esto datos se alinean a los observados en mediciones realizadas en otros campos (Fig. 11).

Las diferencias entre el diámetro medido y simulado están relacionadas con la incertidumbre en algunos parámetros que influyen la geometría del punzado: temperatura y presión de fondo y diferencias entre las propiedades de la roca y el cubo utilizado en los ensayos de superficie. Las condiciones a las cuales se realizan los ensayos se encuentran descriptas en la norma correspondiente (API RP 19B 2021).

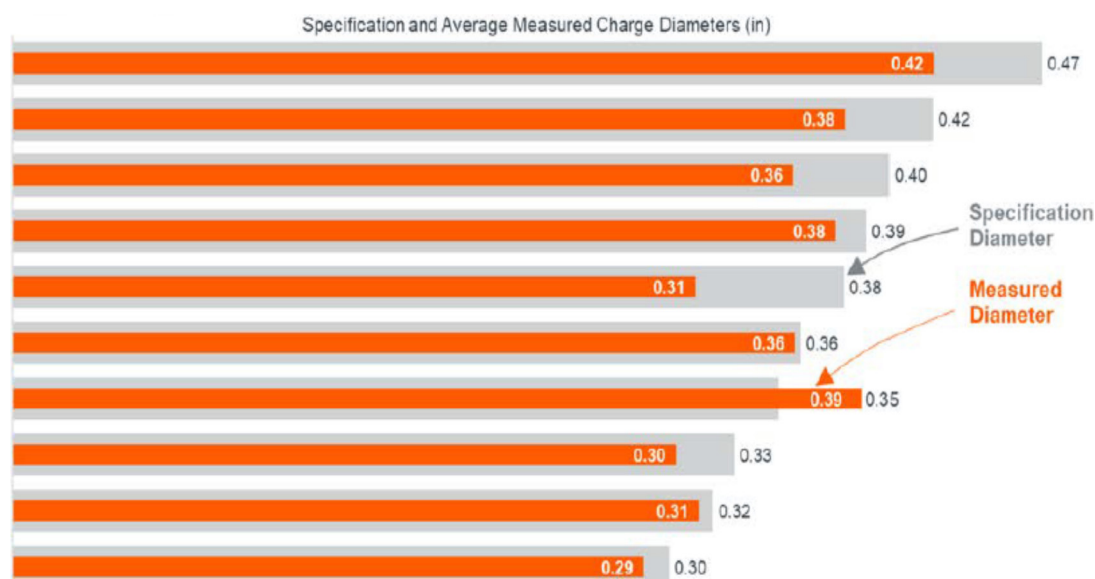


Figura 11. Comparación entre diámetros medidos en superficie, para distintos tipos de cargas y sus correspondientes valores medidos in-situ con cámara de fondo. En la misma se puede apreciar una tendencia a la sobreestimación del diámetro (Roberts *et al.* 2020).

Eficiencia de punzados

A partir del análisis cuantitativo realizado por un software es posible dimensionar la geometría resultante de los punzados para determinar el aumento de tamaño con relación a los valores dimensionales de los punzados bases. De igual manera, un analista verifica que los resultados sean coherentes verificando visualmente que el punzado fue efectivamente erosionado y sus dimensiones y formas post estimulación guardan coherencia con los valores calculados por el *software*. Si ambas interpretaciones coinciden, se interpreta que el orificio fue erosionado por el paso de la arena de fractura. Esta información es la de mayor relevancia ya que nos permite inferir cuál es la eficiencia de *clusters* para los diseños testeados. A continuación, en la Figura 12 puede observarse en cada par de gráficos, la eficiencia de punzados a la izquierda y la eficiencia de *clusters* sobre la derecha. El primer dato hace referencia al número de orificios erosionados con respecto al total y el segundo indica en cuántos *clusters* se vio al menos un orificio erosionado.

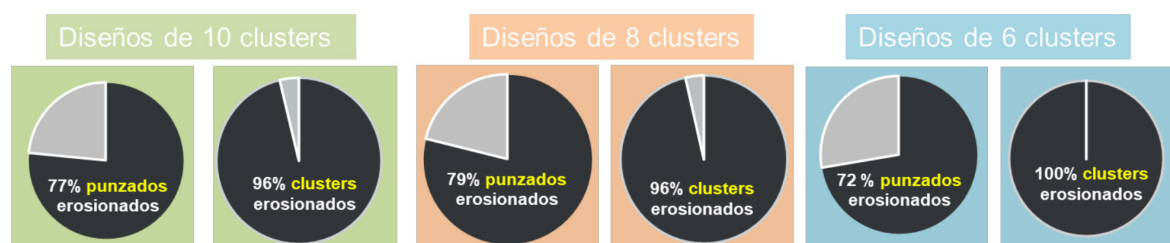


Figura 12. Porcentaje de punzados y *clusters* erosionados, clasificados en 3 grupos de diseños: 6,8 y 10 *clusters* por etapa.

Como primera conclusión obtenida a partir de los datos observados en la Figura anterior. Se puede establecer que un alto porcentaje de los *clusters* punzados se comporta como un punto de iniciación de fractura. Esta conclusión se soporta a pesar de que existen punzados no erosionados ya que los mismos se distribuyen en distintos *clusters*. También se puede observar que esta alta eficiencia se repite para los diferentes diseños de punzados.

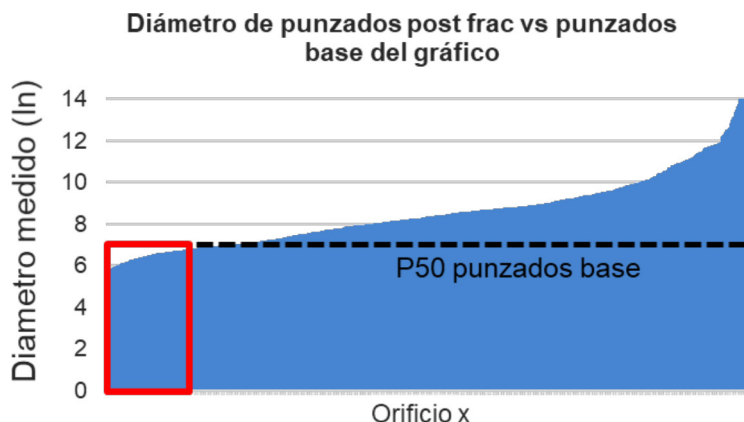


Figura 13. Distribución del diámetro de los orificios medidos versus el promedio de los diámetros del punzado base.

Se continuó profundizando el análisis con el fin de entender si alguno de los diseños ejecutados fue mejor o peor ya que en principio en todos se vio una buena “eficiencia de *clusters*”. En primer lugar, se analizaron los punzados que tenían un diámetro final menor que el diámetro promedio de los punzados bases, sin tomar en cuenta que hayan sido identificados como erosionados o no (Fig. 13).

Clasificando esta muestra dentro de los distintos diseños de punzados, se observó que la mayor proporción se encontraban en los diseños de 6 *clusters* (Fig. 14), diseño con entrada limitada menos exigente. Esto lleva a pensar que diseños de 10 *clusters* con más punzados por *cluster*, podrían incrementar su probabilidad de tener eficiencia de *clusters* más bajas.

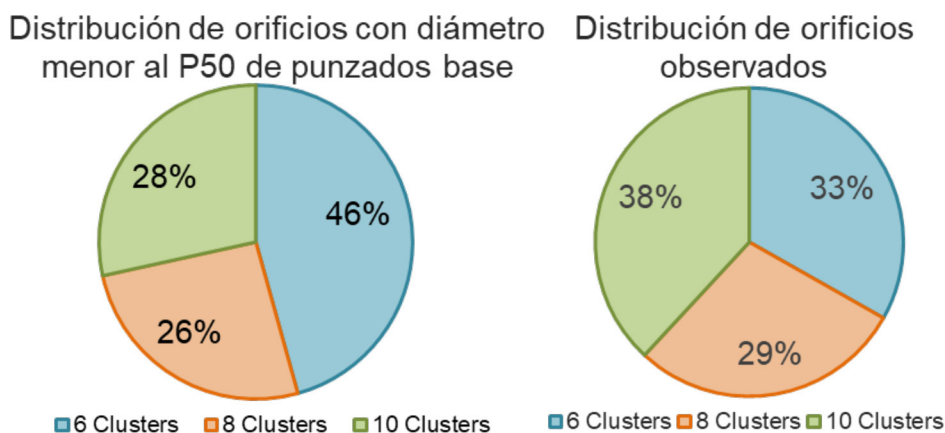


Figura 14. En el gráfico de la izquierda se observa la distribución de los orificios con un diámetro menor que el de los punzados base. El gráfico de la derecha indica cómo está compuesta la muestra total analizada.

Dispersión en la erosión de orificios

Otro punto evaluado fue la dispersión en la erosión medida para los distintos diseños, entendiendo que hay una relación entre cuánto se erosiona un *cluster* y cuánto fluido con arena pasa a través del mismo.

Como puntos relevantes se observó que los diseños con 30 orificios presentan baja dispersión en la erosión, y por el contrario diseños con entrada limitada más exigente o muy poco exigente se muestran con una dispersión en la erosión más deficiente, interpretándose que la menor cantidad o cantidad en exceso de orificios genera un efecto negativo en la distribución de fluido a través de los distintos *clusters*.

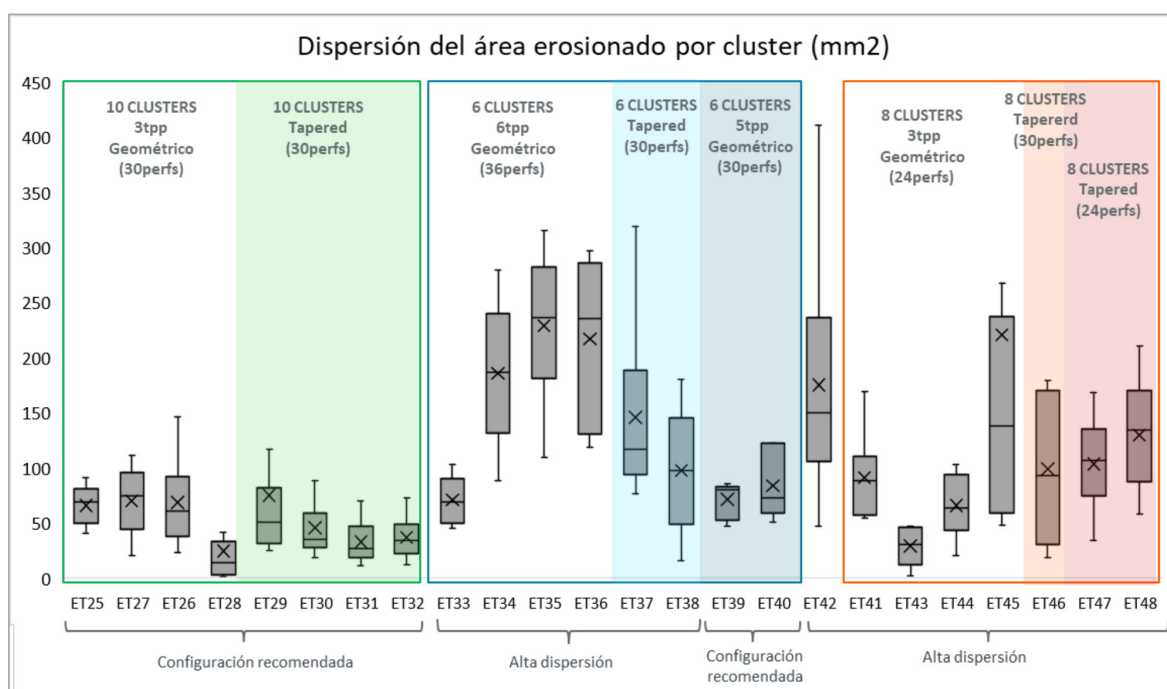


Figura 15. Gráfico representativo de la dispersión en el área erosionada por *cluster* para los distintos diseños testeados

También se observó que los diseños con mayor cantidad de orificios con fases de 60° y caudales por orificio menores a 2,5 bpm fueron los que mayor dispersión en la erosión mostraron, y que a mayores exigencias de entrada limitada también parecieran estar perjudicando la uniformidad en la erosión, pudiendo interpretarse una distribución asimétrica y/o menor eficiencia del tratamiento.

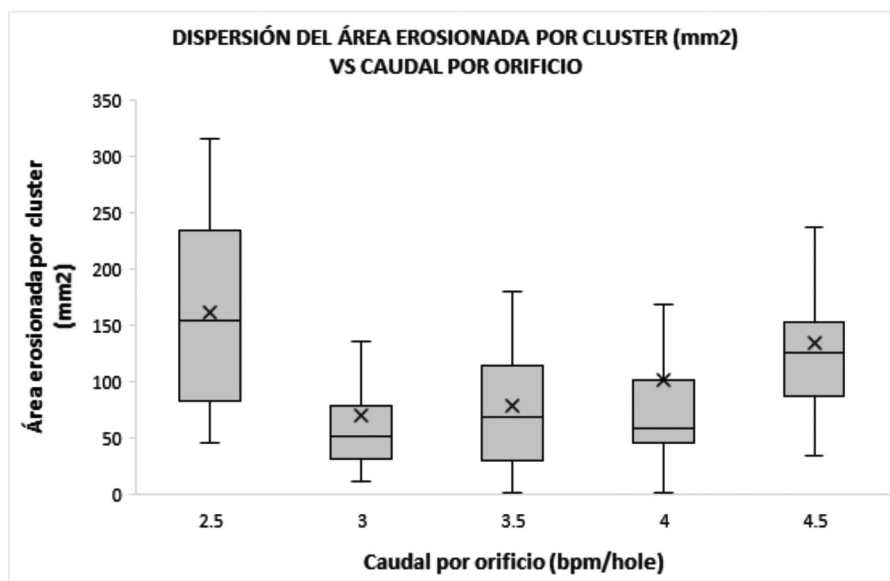


Figura 16. Gráfico representativo de la dispersión en el área erosionada por *cluster* según rangos de caudales por orificio.

Heel/Toe Bias

En este apartado se presentan algunas observaciones acerca del mencionado efecto de *heel bias* y su posible mitigación con una configuración de punzados *taper perf*. En líneas generales, la existencia de este fenómeno indeseado no es tan evidente para los diseños de 8 y 10 *clusters* ejecutados. Por el contrario, la medida de mitigación aplicada no parece generar beneficio alguno, e incluso podría estar causando un impacto negativo al generar un sesgo hacia los *clusters* que se encuentran aguas abajo “toe bias”.

Por otro lado, los diseños de 6 *clusters*, con distribución uniforme de los orificios y entrada limitada poco exigente, sí presentan efecto de “*heel bias*”. Por el contrario, se observó una mayor efectividad para esta misma configuración de *clusters* pero con una Entrada Limitada más exigente. Al igual que ocurre con los diseños de 8 y 10 *clusters*, la modalidad *taper perf* no es eficiente como medida de mitigación para esta configuración.

En general en todos los diseños *taper perf* analizados en este trabajo, la cantidad de orificios ubicados hacia el toe es entre un 30 y un 50 % mayor que la cantidad de orificios ubicados hacia el heel dentro de una misma etapa de fractura. Valor superior al 10% indicado como óptimo (Roberts *et al.* 2020). Esto se debe al número reducido de punzados por *cluster* utilizado en cada diseño, que impide un incremento progresivo en el área de flujo existente entre uno y otro *cluster*.

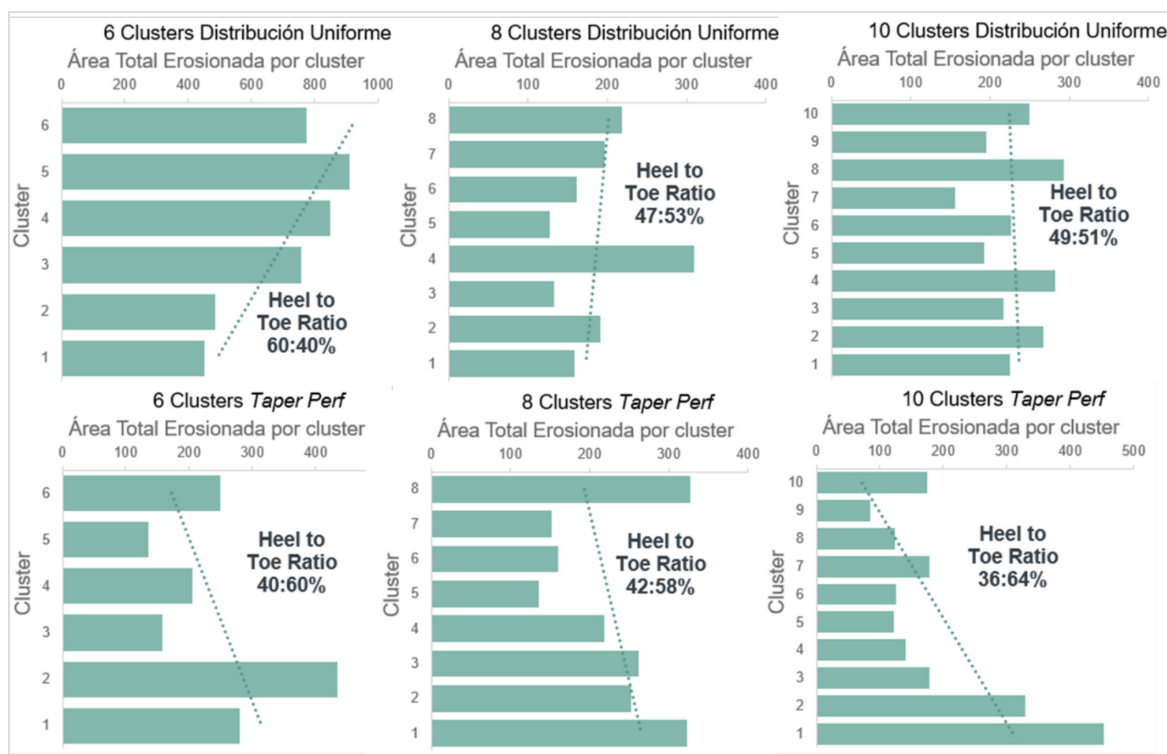


Figura 17. Se muestra el sesgo existente en la erosión.

Efecto de la fase

El análisis de la erosión de los punzados según su fase reveló que existe una tendencia a que los orificios ubicados en la parte “baja” del pozo, que en estos gráficos se identifica como 120 a 240° son los que más se erosionan. Si se asume que esto puede generar una distribución de arena ineficiente dentro de la fractura, es válido plantear la necesidad de probar alguna tecnología que asegure la orientación de punzados en algún plano preferencial.

RESULTADOS DE SIMULACIONES

En la Figura 19, se pueden observar los resultados de un ejercicio de simulación que complementa los análisis presentados. En el mismo se busca modelar el efecto de la dispersión de erosión en punzados en la geometría de fractura.

Para un escenario de mayor complejidad de fracturas (relacionada a presencia de fracturas naturales, T-shapes, *fracture swarms*, etc), la mayor o menor dispersión en el volumen por *cluster* muestra tener un bajo efecto sobre la geometría de estas. A medida que se reduce la complejidad, esta dispersión comienza a verse reflejada en la geometría de las fracturas hidráulicas, observándose

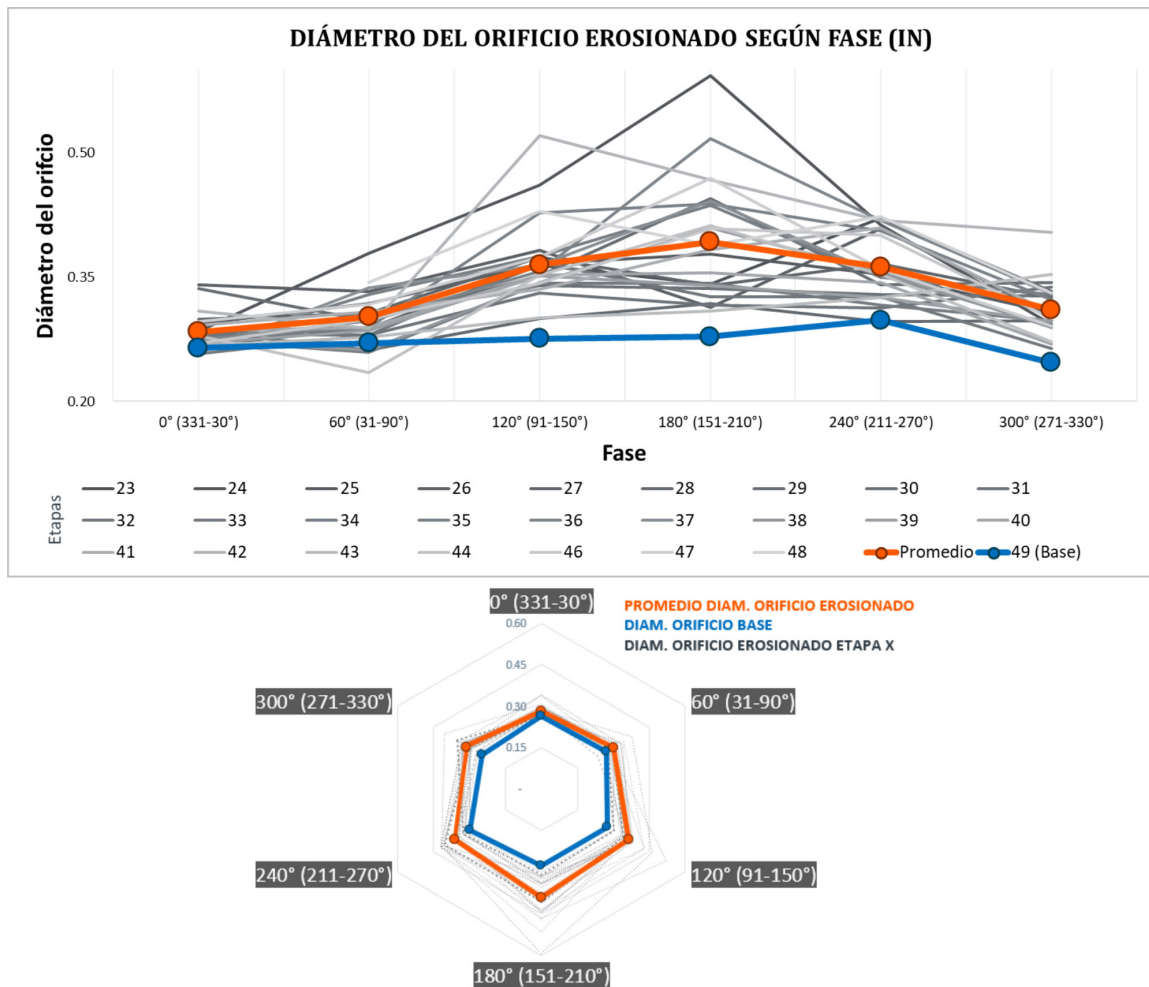


Figura 18. Comparación diámetros de orificio por fase para escenario virgen y erosionado. Mayor grado de erosión en punzados orientados hacia abajo.

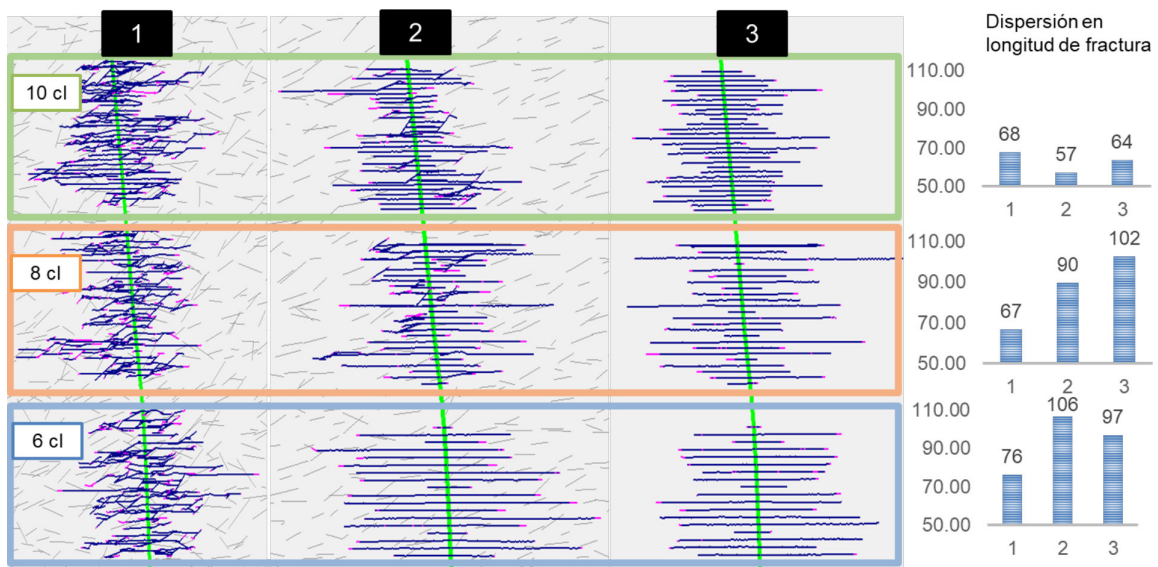


Figura 19. Simulación que evidencia el impacto de la uniformidad/dispersión del tratamiento para distintos escenarios de complejidad.

mayor variabilidad en las longitudes de las mismas. En general no se cuenta con información certera en cuanto al nivel de complejidad de fractura existente, por lo tanto, resulta importante entender qué diseño de punzados favorece una distribución homogénea del tratamiento.

CONCLUSIONES GENERALES

Entre las conclusiones más importantes que se obtuvo con este trabajo encontramos:

- Las mediciones con cámara permiten acelerar el proceso de optimización del diseño de completación en cuanto a punzados. Incluso el diseño que hoy es considerado como óptimo, podría desafiarse y obtenerse así conclusiones rápidamente sin esperar a atravesar una larga curva de aprendizaje.
- Se comprobó la viabilidad de fracturar a través de diseños de punzados de hasta 10 *clusters*, con alta eficiencia.
- Se logró encontrar un rango óptimo en cuanto cantidad de orificios totales o bien en cuanto a diseño de Entrada Limitada (ΔP en punzados)
- A partir de este trabajo no se encuentra una justificación al uso de diseños tipo taper perf para las configuraciones de punzados probadas. En diseños con distribución uniforme de orificios y un ΔP en punzados óptimo, se observaron buenos resultados. Este tipo de configuración presenta la ventaja de permitir la estandarización del tipo de cañón a utilizar, simplificando el armado del mismo, lo cual representa un beneficio desde el punto de vista operativo.

OPORTUNIDADES PARA EL FUTURO

Entre los desafíos y oportunidades a futuro, se detecta la posibilidad de desafiar algunos parámetros de diseño de tal manera de que exista sinergia con otras iniciativas visualizadas:

- Cantidad máxima de *clusters*.
- Distanciamiento mínimo y máximo entre *clusters*.
- Caudal mínimo por *cluster*.
- Reemplazo de los tipos de cañones utilizados para poder orientar los punzados en un plano preferencial.

REFERENCIAS

- | | |
|---|--|
| Cramer, D., 1987. The application of Limited-Entry Techniques in Massive Hydraulic Fracturing Treatments. Production Operations Symposium, SPE, Oklahoma City, Oklahoma, USA. | |
| Khan, S., Oparin, M., Tineo, R. y Bentley, D., 2016. Geomechanical Implications on Unconventional | |

- Reservoir Fracturing in Saudi Arabia. Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas, USA.
- ISO 5167-2, 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full – Part 2 Orifice Plates. Switzerland
- Roberts, G., Lilly, T. and Tymons, T., 2018. Improved Well Stimulation Through the Application of Downhole Video Analytics. Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, SPE, The Woodland, Texas, USA.
- Roberts, G., Souvick, S. y Waldheim, J., 2022. An Expanded Study of Proppant Distribution Trends from a Database of Eroded Perforation Images. International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, SPE, Actas I, Muscat, Oman.
- Strubberg, C., Arcanjo, D., McDonald, J., Lilly, T. y Roberts, G., 2020. Evidence of Significant *Casing* Erosion Damage Caused by Leaking Frac Plugs During Stimulation's Leads to Uncertain Proppant Distribution Results. Annual Technical Conference & Exhibition, SPE, Actas I, Denver, Colorado, USA
- Roberts, G., Whittaker, J., McDonald, J. y Paxson, T., 2020. Proppant Distribution Observations from 20.000+ Perforation Erosion Measurements. Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, SPE, The Woodland, Texas, USA.
- American Petroleum Institute, API RP 19B, 2021. Evaluation of Well Perforators, Third Edition.